

考虑有损大地的35 kV输电线路 避雷器装配优化

有损大地对35 kV输电线路受雷击时雷电流的电磁场传递与耦合有着不可忽略的影响,通过选取合适的工程模型并结合时域有限差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)算法对线路上的雷电感应过电压进行迭代求解。依据我国东、中和西部地区不同土壤电阻率范围例取的3种大地电阻率情况下的杆塔接地电阻值和雷电感应过电压导入由电磁暂态仿真软件(Power Systems Computer Aided Design, PSCAD/EMTDC)搭建的线路模型,进行线路避雷器不同装配方案的仿真模拟。对比分析了不同避雷器安装密度时的雷击线路电压波形及耐雷水平,给出了更符合实际需求的35 kV输电线路避雷器装配方案。分析结果对我国不同地区35 kV输电线路的雷电防护设计及改造具有重要意义。

陈 艺 张 斌 董海鹰/兰州交通大学自动化与电气工程学院

0 引言

据位于多雷区的江苏省某市2013年配电网运行报告显示,35 kV及以上电压等级电网全年共发生雷击故障40起,其中29起发生于35 kV线路,而在引起35 kV线路跳闸的所有故障中,雷击故障占64%。可见相对于中高压电网,35 kV及以下电压等级的低压线路防雷措施薄弱,原因在于国内35 kV输电线路多数无全线避雷线或耦合地线的架设,且绝缘子串防雷击电压耐受值较低,对线路起到的保护作用不足。

线路型避雷器是一种悬挂安装于输电杆塔上的新型避雷器,引用硅橡胶外套金属氧化物避雷器(MOA)的优点,利用阀片电阻的非线性伏安特性(承受过高电压时呈低电阻,承受正常工作电

压时电阻非常高,相当于绝缘体)^[1],具有较大的过电压吸收能力,是近年提升35 kV输电线路防雷保护的重点研究对象。目前,国内许多针对35 kV输电线路避雷器装配的仿真设计均以理想大地为前提,然而实际情况下有损大地对雷击线路分析有着不可忽略的影响。

采用PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件,选取考虑有损大地的感应过电压电磁传播及场线耦合模型,运用时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)迭代求解线路感应过电压,并将不同大地电阻率情况下的杆塔接地电阻和雷电感应过电压列入线路模型,进行避雷器不同装配方案的仿真模拟。通过对雷击后线路电压波形及耐雷水平的分析,最终确定考虑有损大地情况下35 kV输电线路避雷器安装的优化配置。

1 分析条件

1.1 有损大地对杆塔接地电阻的影响

杆塔接地电阻包括4个组成部分,即接地引线的电阻、接地体本身的电阻、接地体与土壤间的过渡电阻和大地的散流电阻。与散流电阻相比,前3种电阻要小得多,一般均忽略不计。接地体一般也都是钢材等良导体,其电阻值可忽略不计。大地通常都有一定的湿度,土壤中的吸湿微粒紧紧地贴附在接地体上,其接地体与土壤间的接触电阻一般可以忽略。电流由接地体向大地流动时,越靠近接地装置则电流密度越大,流散电



陈 艺/硕士研究生

关键词/Keywords

线路避雷器·
有损大地·
FDTD·
感应过电压·
EMTDC/PSCAD·

国家自然科学基金(61165006)。

流所遇到的阻力也越大,即其电阻也越大。从接地电阻的分布情况来看,90%以上的电阻分布在接地体周围的土壤中^[2]。这样一来,接地电阻(R_e)就等于从接地体到地下远处零电位面之间的电位(U_e)与流过的工频或直流电流(I_e)之比,即

$$R_e = U_e / I_e \quad (1)$$

由于

$$U_e = \int_{R_0}^{\infty} dU = \frac{\rho I_e}{2\pi} \int_{R_0}^{\infty} \frac{dX}{x^2} = \frac{\rho I_e}{2\pi R_0} \quad (2)$$

所以

$$R_e = \frac{\rho}{2\pi R_0} \quad (3)$$

可见,杆塔接地电阻与土壤电阻率 ρ 和接地体的尺寸等因素有关。土壤电阻率越小,接地电阻值越小。

根据理论分析和实测结果,DL/T 621—1997《交流电气装置的接地》中建议,对有关架空线路杆塔的工频接地电阻 R 计算方式分类如下^[3]。

在我国东部土壤电阻率 $\rho \leq 100 \Omega \cdot m$ 的潮湿地区,可利用铁塔和钢筋混凝土杆自然接地,则

$$R \approx 0.3\rho \quad (4)$$

在我国中部土壤电阻率 $100 \Omega \cdot m < \rho \leq 300 \Omega \cdot m$ 的地区,除利用铁塔和钢筋混凝土杆的自然接地外,并应增设人工接地装置,接地极埋设深度不宜小于0.6 m,则

$$R \approx 0.05\rho \quad (5)$$

在我国西部土壤电阻率 $300 \Omega \cdot m < \rho \leq 2000 \Omega \cdot m$ 的地区,可采用水平敷设的接地装置,接地极埋设深度不宜小于0.5 m,则

$$R \approx \frac{0.062\rho}{n+1.2} \quad (6)$$

式中, n 为水平射线根数, $n \leq 12$,每根长约为60 m。

1.2 有损大地对雷电感应过电压的影响

当雷击线路附近大地或线路杆塔时,由于雷电通道周围空间电磁场的急剧变化,会在输电线路产生过电压^[4]。要对其进行数模计算,需在主放电雷电流回击模型的基础上,分析其垂直电场 E_z 、水平电场 E_r 及水平磁场 H_r ,建立相应的场线耦

合模型并求解。不同的大地电导率会使雷电流镜像产生畸变,有损大地对感应过电压的影响则主要体现在镜像电流与源电流的水平电场分量及其线场耦合的形成过程中。

Cooray提出了全距离计算地面附近水平电场的方法^[5]。在此基础上,Rubinstein提出了考虑有损大地的雷电流产生的水平电场的计算方式,即

$$E_r(r, z, j\omega) = E'_r(r, z, j\omega) - H'_r(r, 0, j\omega) \frac{c\mu_0}{\sqrt{\epsilon_{rg} + \sigma_g/j\omega\epsilon_0}} \quad (7)$$

式中, σ_g 为大地的电导率; ϵ_{rg} 为大地相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数。式(7)又被称为Cooray—Rubinstein公式^[6]。

在较早的线场耦合模型中,通常只考虑垂直电场的作用。Agrawal提出了考虑有损大地的水平电场的线场耦合模型,即

$$E_r(x, h, t) = \frac{\partial u^s(x, t)}{\partial x} + L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + \int_0^t \epsilon(t - \tau) \frac{\partial i(x, \tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (8)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} + Gu^s(x, t) + C \frac{\partial u^s(x, t)}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

式中, h 为线路距离地面的高度; $u^s(x, t)$ 为水平电场产生的分布电压; $i(x, t)$ 为线路上分布的电流; G 为线路的电导; $\epsilon(t)$ 为土壤的瞬态电阻; L 、 C 分别为线路的电感和电容^[7]。

目前的研究结果已论证出有损大地对雷电感应过电压在最大幅值和极性上的影响,具体表现为大地电导率越小,电压幅值衰减越明显,并且衰减的同时波形变化逐渐增大,甚至会出现电压极性改变的现象^[8-10]。

2 雷击线路仿真

采用具有更好暂态分析能力的电磁仿真软件PSCAD/EMTDC进行系统仿真。所仿多导体线路长为2.2 km,相邻杆塔间隔为200 m,导线平均悬挂高度为12 m。仿真平台包括传输线、接地电阻、避雷器、绝缘子、杆塔、雷电流和两个自定义元件。

前4种元件均采用相应的软件自有模型。其

中, 避雷器模型的伏安特性参数设置模仿YH5WZ-51/134型无间隙金属氧化物避雷器, 额定电压为51 kV。绝缘子模型使用软件中的开关模型来模拟, 该开关由绝缘子两端瞬时电压控制, 超过相应时刻绝缘子串秒伏特性电压时, 开关即闭合, 对应的开关判据程序编写于一个自定义模块中, 此判据的判断过程中计入了杆塔波过程的时间, 故杆塔采用了单一波阻抗模型来模拟。根据DL/T 620—1997 推荐, 选取门型杆波阻抗为250 Ω , 波速为280 m/ μ s^[11]。图1为雷击线路仿真模型。

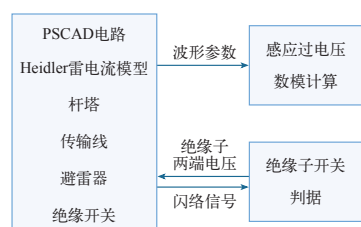


图1 雷击线路仿真模型

另一个自定义元件中则存放了考虑有损大地的感应过电压工程模型计算程序, 感应雷各发展阶段所使用的模型及参数设定如表1所示^[12-14]。最终推导出的Agrawal场线耦合方程组则使用一阶及二阶中心差分进行离散后得到FDTD迭代公式, 即使用时域有限差分法迭代求解线路感应过电压。其中, 设雷击点为仿真坐标原点, 雷电通道、水平通道、时间的剖分步长 Δh 、 Δx 和 Δt 均设置为自定义元件的用户可访问变量, 需根据FDTD的Courant稳定性条件及仿真时长和准确度进行调整。

表1 感应雷各发展阶段所用模型及参数设定

工程模型		相关参数
雷电流波形	双指数	$I_p = 90 \text{ kA}$, $\tau_1 = 2 \mu\text{s}$, $\tau_2 = 50 \mu\text{s}$
雷电回击	MTLL	$V_f = 1.3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $H = 12 \text{ km}$, $v = v_f$
电磁场分布	Cooray-Rubinstein	$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, $\epsilon_{rg} = 10$, $\mu_0 = 1 \text{ H/m}$
场线耦合	Agrawal	$\sigma_{air} = 5e^{-14} \text{ S/m}$

表1中, I_p 为雷电流峰值; τ_1 、 τ_2 分别为雷电流上升、衰减速度; V_f 为雷电通道发展速度; H 为雷电通道长度; v 为雷电通道电流传播速度; μ_0 为空气磁导率; σ_{air} 为空气电导率。

依据我国东部、中部和西部的不同土壤电阻

率范围, 分别取20 $\Omega \cdot \text{m}$ 、200 $\Omega \cdot \text{m}$ 和500 $\Omega \cdot \text{m}$ 3种有损大地情况进行分析^[3], 对应的土壤电导率则分别为0.05 S/m、0.005 S/m和0.002 S/m。基于式(3)~式(6), 相应情况下的接地电阻值需分别设为6 Ω 、10 Ω 和15 Ω 。据此得到的不同土壤电导率时雷电感应过电压波形如图2所示。

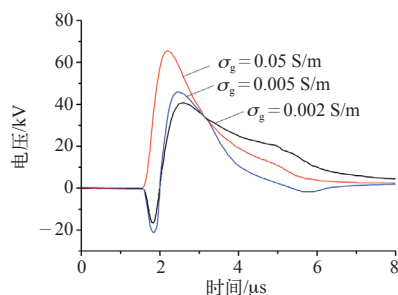


图2 不同土壤电导率时雷电感应过电压波形

3 线路避雷器装配的优化分析

3.1 基于雷电感应线路过电压的分析

有损大地对35 kV输电线路雷电防护造成影响的原因, 主要在于土壤电导率对雷电感应电压和杆塔接地电阻的影响, 前者的幅值和极性会随之变化, 后者的取值亦随之变化, 从而成为设计线路避雷器装配方案时必须考虑的因素。

综合实效和经济等因素的考虑, 比较了如下3种避雷器装配方案: 全线无避雷器安装, 绝缘无穷大; 每5支杆塔安装1组避雷器; 每3支杆塔安装1组避雷器。

图3~图5为这3种装配方案分别在0.05 S/m、0.005 S/m和0.002 S/m土壤电导率时的雷电感应线路过电压波形。

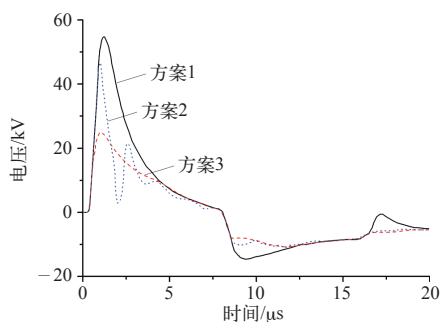


图3 3种装配方案在0.05 S/m土壤电导率时的雷电感应线路过电压波形

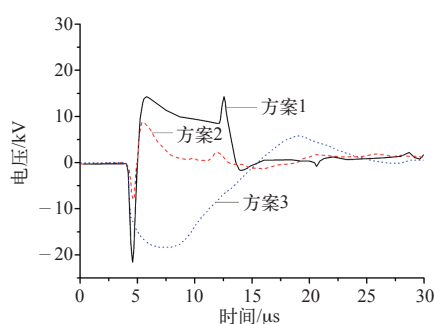


图4 3种装配方案在0.005 S/m土壤电导率时的雷电感应线路过电压波形

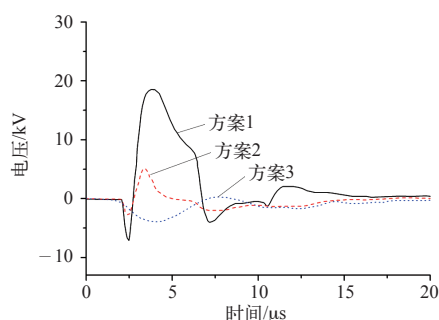


图5 3种装配方案在0.002 S/m土壤电导率时的雷电感应线路过电压波形

由图3可以看出,雷电感应线路过电压的幅值随着避雷器安装密度的增大而减小,每3支杆塔安装一组避雷器后,感应过电压降低了55%,雷电防护效果明显。但安装密度减小至每5支一组后,避雷器的过电压限制效果不大,安装密度再减小则效果更微。

图4中的雷电感应线路过电压波形在土壤电导率为0.005 S/m的情况下产生,与图3中的情况即0.05 S/m土壤电导率的过电压波形相比,很明显电压的极性出现了反转,且正负极性的过电压幅值均会对线路防护产生威胁。每5支一组和每3支一组的安装密度下,过电压的正极性的幅值差别虽然不大,但负极性的幅值差别很大,每3支一组的安装密度已可以将过电压负极性幅值降至-10 kV以内,且过电压波形振荡幅度更小,更早出现平缓。

在土壤电导率为0.002 S/m即500 Ω·m的西部高土壤电阻率地区,由图5可以看出,每3支一组和每5支一组的安装密度均可将雷电感应线路过电压幅值降低60%以上,且两种安装密度下的过电压正负极幅值差别并不大,故处于经济角度考虑,5支一组的安装密度已足够满足线路的雷电防护。

3.2 基于耐雷水平的分析

我国电力行业标准规定,35 kV及以下电压等级线路一般不沿全线架设避雷线,因为即使架空避雷线能对防直击雷起到保护作用,但是感应过电压和雷电反击过电压还是会使得35 kV架空线路发生过电压击穿事故。又由于经济因素,实际中的35 kV线路多数亦无耦合地线架设,故在本文的耐雷水平计算中将忽略避雷线与导线高度的差别及导线间的耦合系数,耐雷水平公式简化如下,即

$$I_1 = \frac{U_{50\%}}{R_i + \frac{L_i + h_c}{T_i}} \quad (10)$$

式中, $U_{50\%}$ 为绝缘子串的50%放电电压; R_i 为杆塔冲击接地电阻; L_i 为杆塔等效电感; h_c 为导线悬挂平均高度; T_i 为直击雷电流的波头长度。

对于有避雷线的35 kV输电线路反击耐雷水平应不低于20~30 kA,无避雷线情况下耐雷水平则要求更高。

根据式(10)以及仿真中直击雷与感应雷同时作用下,绝缘子串开关模型两端瞬时电压超过相应时刻绝缘子串秒伏特性电压的电压值统计,计算得出表2。

表2 不同避雷器安装情况下的线路耐雷水平值

耐雷水平/kA 土壤电导率/(S/m)	安装方案		
	方案1	方案2	方案3
0.05	29.1	54.3	159.5
0.005	24.7	56.4	111.2
0.002	19.3	73.3	89.9

如上文所述,3个土壤电导率采样所对应的杆塔接地电阻呈小幅增大趋势,同时对应作用于线路上的感应电压波形幅值程明显减小趋势。在其作用下,绝缘子串仿真模块的闪络电压值则有所提升。此外,从表2中可以看出,土壤电导率的大小与线路耐雷水平无直接关系;

不同土壤电导率时,随着线路避雷器安装密度的增大,线路耐雷水平均得到明显提升,但是在土壤电阻率较大的地区,避雷器的安装密度对耐雷水平的提升程度并不如土壤电阻率小的地区明显。

4 结束语

1) 在35 kV电压等级的输电线路中,有一定的土壤电阻率则会对杆塔接地电阻及雷电感应过电压产生一定的影响,因此在对线路防雷保护的仿真设计中,应当因地制宜,在确定土壤电阻率范围后,选用相应的接地电阻值和雷电感应电压进行仿真。在不同的土壤电阻率情况下使用相同的不考虑有损大地的感应电压进行仿真分析是不准确的。

2) 在以 $20\ \Omega\cdot\text{m}$ 和 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 土壤电阻率为例的我国东、中部多雷地区,35 kV输电线路的避雷器安装密度越大,防雷保护效果越好,基于本文中的仿真模型,推荐的安装密度为每3个杆塔安装一组。

3) 在以 $500\ \Omega\cdot\text{m}$ 高土壤电阻率为例的我国西部地区,雷电防护效果并不随着避雷器安装密度的增加产生明显效果,且我国西部属于平均年雷暴日不超过15天的少雷区,相对于安装避雷器,更加有效的防雷方法是降低杆塔接地电阻。基于本文中的仿真模型,推荐的安装密度为每5个杆塔安装一组。

4) 土壤电阻率虽然会对杆塔接地电阻值和雷电感应过电压产生直接影响,并且线路耐雷水平的作用因素也包含接地电阻值和受雷电感应电压影响的绝缘子串50%放电电压,但土壤电阻率与线路耐雷水平无明确关系,因此不能简单归结土壤电阻率大的地区,线路耐雷水平就低。

参考文献

- [1] 鲁铁成. 电力系统过电压 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [2] 刘刚, 邓春林. 防雷与接地技术 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2011.
- [3] DL/T 621—1997 交流电气装置的接地 [S].
- [4] 施荣, 屠幼萍, 张媛媛, 等. 避雷器改善35 kV配电线路耐雷水平的效果分析 [J]. 电网技术, 2006, 30 (19): 92-96.
- [5] Cooray V. Calculating lightning-induced overvoltages in power lines: a comparison of two coupling models [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic

Compatibility, 1994, 36 (3): 179-182.

- [6] Rubinstein M. An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long range [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1996, 38 (3): 531-535.
- [7] Agrawal A K, Price H J, Gurbaxiani S H. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1980, 22 (2): 119-129.
- [8] Shoory A, Moini R. Analysis of lightning-radiated electromagnetic fields in the vicinity of lossy ground [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47 (1): 131-145.
- [9] Rachidi F, Nucci C A, Ianoz M, et al. Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1996, 38 (3): 251-252.
- [10] Cooray V. Some considerations on the Cooray-Rubinstein formulation used in deriving the horizontal electric field of lightning return strokes over finitely conducting ground [J]. IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility, 2002, 44 (4): 560-566.
- [11] DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合 [S].
- [12] Orlandi A, Paul C R. FDTD analysis of lossy multiconductor transmission line terminated in arbitrary load [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1996, 38 (3): 388-398.
- [13] Nucci C A. The lightning induced over-voltage (LIOV) code [C]. Power Engineering Society Winter Meeting. Singapore, IEEE/LET, 2000 (4): 2311-2349.
- [14] Nucci C A, Rachidi F, Ianoz M, et al. Comparison of two coupling models for lightning-induced overvoltage calculations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10 (1): 330-339.

(收稿日期: 2015-06-23) **EA**